

ロボットアームの強度的危険性を回避するための動作計画法 —慣性項の導入—

Motion Planning of Robot Arm to Avoid Structural Damage -Introduction of Inertia -

○ 学 山口 良規 (筑波大) 正 磯部 大吾郎 (筑波大)

Yoshiki YAMAGUCHI, Univ. of Tsukuba, yoshiki-yamaguchi@edu.esys.tsukuba.ac.jp
Daigorō ISOBE, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp

In this paper, a motion-planning scheme that enables robot arms to avoid structural damage is described. By using this scheme, the robot arms are encouraged to protect themselves from structural damage by searching for a safer attitude when their structural risk becomes high during their given tasks. The structural risk is determined by using two parameters, i.e., yield function value and total strain energy in the architecture. Furthermore, more strict risk judge is enabled by considering inertia in target motion calculation algorithm.

Key Words: Robot arm, Motion planning, Inertia, Flexible link

1. 緒言

昨今まで、ロボットが使用される場面としては工場などが多く、人々の生活環境で直接触れ合う機会はほとんどなかった。しかし、今後介護ロボットや生活支援ロボットなど、ロボットが我々の生活の一部になることがますます増えてくるであろう。人間の生活環境へロボットを導入する際、安全性が第一である。アシモフは著書の中で「ロボット3原則」を提案している。その第3条に、第1条：人間に危害を及ぼさないこと、第2条：人間の命令に従うこと、に反さない限り自己を守らなければならないとある。第1条および第2条に対応した研究例は数多くあるが、第3条に関する研究はあまり見受けられない。

そこで、軽量化設計された低強度なロボットの強度上の問題を解決するために、ロボット機構を構造工学的に捉え、その強度的な危険性を評価し、機構の破損を回避させるような動作計画法を提案した。本手法は、有限要素法を用いた構造解析を行い、断面力レベルでの部材の降伏関数値と機構に蓄積される全ひずみエネルギーという2つのパラメータに基づいて姿勢を変更し、機構の強度的な危険性を回避するというものである。

先行研究では、上記2つのパラメータを用いた動作計画法について、ロボットアーム動作時の強度的問題を解決する手段として有効であることが確認されている[1]。しかし、ステップごとに静的に降伏関数値および全ひずみエネルギーを計算するため、慣性力の考慮がされておらず、運動量が大きく、本来は危険な状態に達しているような場合でも解析上では危険判定がなされなかった。そこで本研究では、慣性項を導入したロボットアームの動作計画を行った。

2. 動作計画法

本節では、ロボットアームの強度的危険性を回避するための動作計画法を構築する上で重要な、軌道計算アルゴリズムおよび降伏関数値と全ひずみエネルギーの算出方法について説明する。

2.1 軌道計算アルゴリズム

本研究で使用される軌道計算アルゴリズムは、有限要素解析で用いられるものをフレキシブルリンク系の運動学計算に応用したものである。本手法の特長としては、運動方程式を増分型で表現することで解を逐次的に求める近似解法となっている点、また、それを能動的に動作する機構に適応させた点である。

機構の動作による慣性力を考慮すると、仮想仕事の原理より時刻 $t + \Delta t$ における増分型運動方程式は次式で定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{F\}$ は節点力ベクトル、 $\{R\}$ は要素内力ベクトル、 $\{\ddot{u}_m\}$ はリンクの動作による節点加速度ベクトル、 $\{\ddot{u}_d\}$ はリンクの変形による節点加速度ベクトル、 $\{\dot{u}_d\}$ はリンクの変形による節点速度ベクトル、 $\{\Delta u_d\}$ はリンクの変形量増分ベクトルである。式(1)に Newmark の β 法を適用し節点加速度の総和ベクトルを次式により算出すると、これがアーム動作時の剛性項、減衰項および慣性項を考慮した軌道となる。

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + \{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} \quad (2)$$

2.2 降伏関数値の算出

ロボットを構成する部材の破損回避のために、部材の断面力レベルでの降伏危険性を監視する。各部材の強度的危険性の判定値として以下の降伏関数値を用いる。

$$f_y = \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 \quad (3)$$

ここで、 N 、 M_x 、 M_y はそれぞれ軸力、 x 、 y 軸回りの曲げモーメント、添字“0”は全断面塑性値を意味する。この値が危険判定値 k_{yc} (0.0~1.0) に達した時、危険が判定されたとみなす。また本研究では、1つのリンク部材を1つの Bernoulli-Euler はり要素でモデル化している。

2.3 全ひずみエネルギー値の算出

機構に外力が作用すると、機構内部にひずみエネルギーが蓄積される。その際に、蓄積されたひずみエネルギーの総和を減少させることで、機構に加わる負担を平均的に軽減することができると考えられる。そこで、機構内部に発生するひずみエネルギーを抑制する姿勢変更アルゴリズムを動作計画に加えた。ひずみエネルギー U は次式によって数値的に求める。

$$U = \int_V \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \sum_i^n \{\varepsilon\}_i^T \{\sigma\}_i l_i \quad (4)$$

ここで、 $\{\varepsilon\}_i$ は*i*番目の要素のひずみベクトル、 $\{\sigma\}_i$ は断面力ベクトル、 l_i は要素長、 n は総要素数である。

3. 動作計画法の検証と解析

本節では、慣性項を導入する場合としない場合での危険判定の相違について比較・検証した。

3.1 タスクおよび動作計画の概要

解析対象としたロボットアームの仕様を表1に示す。アームには、関節モータの質量として1kg、先端質量として5kgを付加している。アームを水平面に対し垂直な状態から90°回転させ、1秒間で水平面と平行になるまでをタスクとした。タスクを実行中、部材の降伏関数値が増加し危険判定値に達すると、降伏関数値を減少させる方向へ第3関節から回転させる。その後、全ひずみエネルギーが抑制目標値に達するまで関節を回転させていく。先端リンクの動きのみでは抑制不可となった場合、第2関節、第1関節の順で回転させる。以上のタスクに対し降伏関数値および全ひずみエネルギーを監視し、ロボットアームが危険な姿勢となることを回避する動作計画を行う。

3.2 解析結果

危険判定値を $k_{yc}=0.15$ 、抑制目標値を危険判定がなされたときの全ひずみエネルギーの60%とした。この条件で慣性項を導入しない場合とした場合のアームの動作計画結果を図1と図2に示す。また、両者の場合での降伏関数値と全ひずみエネルギー値の推移を図3および図4に示す。特に、図2中の各番号での姿勢時に示す2つのパラメータ値を図3および図4では示している。図3の降伏関数値の推移を辿ると、1で危険性が判定された際に、本来の第1関節のタスク動作を停止し、第3関節を動かし姿勢変更するために一時的に降伏関数値が小さくなっている。その後先端が第3関節より水平方向に離れるため降伏関数値が大きくなるが、図2の2を超えると抑制へ向かう。全ひずみエネルギーの値が図4の1の時点での値の60%となる3の状態になると本来のタスクへと戻る。

今回の解析では、慣性項を導入する場合としない場合での相違点が2つ確認できた。1つは危険回避動作を行う際、降伏関数値を減少させる方向へ第3関節から回転させたが、静的な動作では運動方向とは逆側へ、慣性項を導入したものでは運動方向へ関節が回転したことである。これは、慣性項を考慮した場合、運動方向とは逆側へ関節を回転させると、慣性力がより大きくなり部材に負荷がかかってしまい、それを緩和する順方向へ動作が進むためである。2つ目に、危険判定時期の相違である。これは図3より確認できる。原因としては、慣性力が加えられたことにより降伏関数値が増加したためである。高速運動時や部材の振動振幅が大きい場合、慣性力の考慮がより重要になることが確認された。

4. まとめ

慣性項を導入した解析を行うことによって、静的な解析のみでは危険判定されなかった姿勢でも実際には危険度が増していることを確認できた。また回避姿勢も両者では異なるものとなった。

今後は、より複雑なタスクを実行中に危険性を回避することが可能か検証する予定である。

Table 1 Properties of link member

Material	Link section [mm ²]	Link length [m]	Young's modulus [GPa]	Density [kg/m ³]
Aluminum	100	0.2	70.3	2.8×10 ³

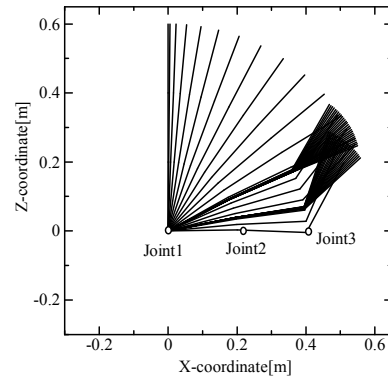


Fig.1 Motion planning without considering inertia

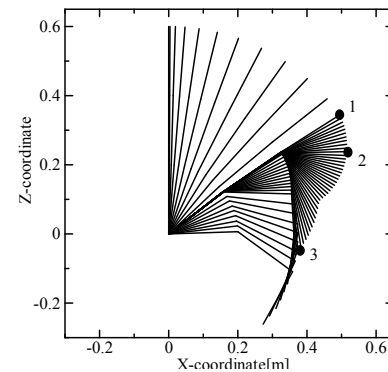


Fig.2 Motion planning by considering inertia

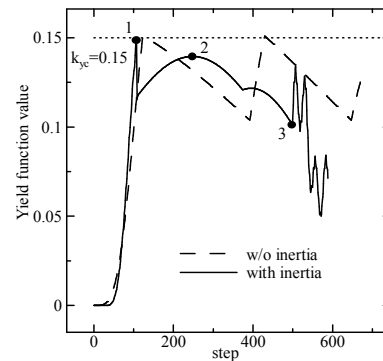


Fig.3 Yield function value

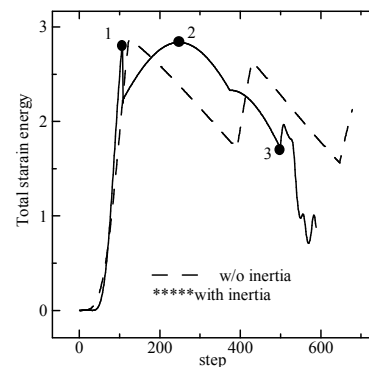


Fig.4 Total strain energy

参考文献

- [1] 磯部大吾郎, 小松祥人, "機構の強度的安全性を優先したマニピュレータの動作計画", ロボット学会誌 vol21, No.5-6, pp.533-554, 2007.